

Sensores con fibra óptica de plástico para la medida remota de nivel

C. Vázquez, A. B. Gonzalo, J. J. Romeral,

J. M. S. Pena,

Dpto. de Tecnología Electrónica

E.P.S. Universidad Carlos III de Madrid

Av. Universidad 30, 28911 Leganés (Madrid)

Tfno: 916249191

Fax: 916249430,

e-mail: cvazquez@ing.uc3m.es

Áreas de interés: Sensores.

Palabras clave: sensor de nivel, fibra óptica.

1.- Introducción.

La industria demanda cada vez más métodos de medida que sean intrínsecamente seguros para aplicarlos en entornos industriales, como pueden ser atmósferas inflamables; y que eviten, en la medida de lo posible, el daño ecológico. Por ejemplo, en muchas gasolineras la necesidad de rellenar los depósitos de combustible se fija mediante control visual. Sin embargo, mientras el tanque permanece abierto se emiten a la atmósfera compuestos orgánicos volátiles (COV) que perjudican tanto la capa de ozono como la salud del operario que realiza la comprobación. La emisión de este tipo de compuestos constituyó en el año 1998 el 20% de la emisión total de contaminantes [1]. En la actualidad, países como México [2] financian el desarrollo e instalación de dispositivos electrónicos para evitar los problemas mencionados anteriormente.

Los métodos utilizados habitualmente en la medida de nivel ya sean mediante sensores de tipo mecánico (flotadores), sensores ultrasónicos [3], de tipo radar o mediante microondas, presentan un inconveniente común a la hora de aplicarlos en atmósferas inflamables: la electrónica de control del dispositivo se sitúa próxima al punto de medida. En esta situación, el calor generado por los diferentes circuitos puede originar situaciones peligrosas, suponiendo además un coste adicional en los prototipos al necesitar diseños especiales que permitan evitar dicho problema.

Los dispositivos ópticos, donde sólo se utilizan materiales inertes, como las fibras ópticas, constituyen una tecnología intrínsecamente segura. Dichas fibras ópticas presentan otras ventajas como la ausencia de interferencias electromagnéticas (EMI), bajo peso, y ser un medio de transmisión con bajas pérdidas y gran ancho de banda.

Existen diversos dispositivos basados en láseres e instrumentación óptica (ej. ref. [4]) utilizados en la medida de nivel. Sin embargo, en muchos de ellos el láser, junto con el controlador electrónico, están en la cabeza del sensor. El empleo únicamente de fibra óptica en la cabeza sensora permite evitar la presencia de la electrónica en el punto de medida. Esta idea se ha utilizado en diferentes sensores ópticos para medir distancias cortas [5-7], en sensores intrusivos [8] o como simples dispositivos de control [9-11]. Una cabeza sensora para medida de largas distancias basada en fibras ópticas se recoge en [12] pero su diseño resulta complejo, no utiliza multiplexado óptico y se basa en la medida del tiempo de vuelo.

En nuestro grupo se ha desarrollado un sistema multisensor para medida de nivel que se basa en el empleo de fibra óptica de plástico (FOP) en la cabeza sensora y como medio de transmisión en la red óptica. Se pueden tomar medidas en varios tanques o distintos puntos en un mismo tanque, utilizando multiplexación por división de frecuencia y acopladores direccionales de fibra óptica [13-14]. En esta contribución se discute el principio de funcionamiento de dicho sensor y, a partir del modelo propuesto, se estudia la influencia que sobre la respuesta del sensor tiene la modificación de diferentes parámetros de la cabeza sensora, buscando aquellas configuraciones que permitan optimizar la respuesta del sensor. En primer lugar se describen brevemente los distintos bloques del sensor para pasar a presentar el modelo y su discusión.

2.- Estructura del sistema.

En la referencia [13] se describen con detalle cada uno de los bloques de los que consta el sistema multisensor, por lo que aquí únicamente se realizará un breve resumen. En la figura 1 se muestra un esquema del sistema completo. La señal luminosa utilizada para medir el nivel de líquido se produce en la "unidad de generación" y es transmitida al tanque y recogida, tras su reflexión en la superficie del líquido por las cabezas sensoras. En la unidad de detección y procesado se transforma al dominio eléctrico, se extrae la información y se prepara para su transmisión al microcontrolador. Finalmente, se envía a través de un puerto RS-232 al ordenador. A través de un programa informático desarrollado para tal fin, se configura el sistema y se muestran los resultados de las medidas en los diferentes tanques, así como la activación de una serie de señales de alarma en el caso de que el nivel de líquido en alguno de los tanques sobrepase los niveles límites definidos previamente por el usuario.

La escalabilidad del sistema se consigue utilizando multiplexación por división de frecuencia. Cada sensor utiliza un diodo láser modulado a una frecuencia específica. Tras ser reflejado por la superficie del líquido se multiplexa ópticamente en una única fibra y es transmitido a la unidad de detección y procesado.

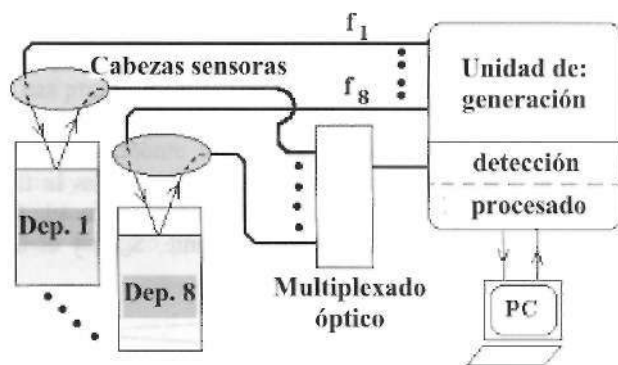


Figura 1. Esquema del sistema multisensor

2.- Principio de funcionamiento de la cabeza sensora.

En la figura 2 puede verse la fotografía de dos cabezas sensoras utilizadas en el prototipo. Están formadas por la fibra emisora y receptora, la lente y un receptáculo en forma de "L" que soporta todos los componentes y permite su adecuada disposición [14].

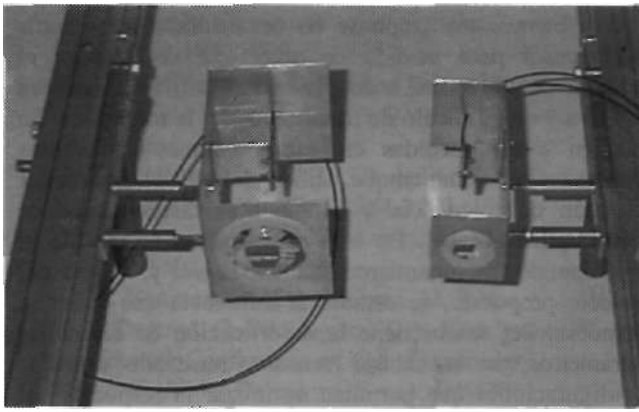


Figura 2: fotografía de dos cabezas sensoras

Las fibras son de plástico (FOP), con una atenuación de 0.24 dB/m a 650 nm.

2.- Principio de funcionamiento de la cabeza sensora.

En la figura 2 puede verse la fotografía de dos cabezas sensoras utilizadas en el prototipo. Están formadas por la fibra emisora y receptora, la lente y un receptáculo en forma de "L" que soporta todos los componentes y permite su adecuada disposición [14]. Las fibras son de plástico (FOP), con una atenuación de 0.24 dB/m a 650 nm. Las cabezas de la fotografía están formadas por lentes de diferente radio (30 mm y 12.7 mm) y de diferente material.

La disposición de los elementos que forman la cabeza sensora es como sigue. Ambas fibras se sitúan en el plano focal de la lente, simétricas respecto al foco de la misma (véase la figura 3). Con esta configuración, detrás de la lente se obtendrá un haz colimado, inclinado un pequeño ángulo respecto al eje óptico de la misma (trazo continuo en la figura 3). Debido a este pequeño ángulo, el haz sufre un desplazamiento lateral que depende de la distancia entre la lente y la superficie del líquido, D. En consecuencia, la lente recoge sólo una parte del haz, cuya imagen se forma en el plano focal, en un punto simétrico a la fibra emisora, en relación con el foco, posición en la que se sitúa la fibra receptora.

Suponiendo que:

- la absorción de la radiación del láser por el aire es despreciable,
- la fibra emisora se coloca de modo que su apertura numérica no produzca ninguna limitación,
- la potencia esté uniformemente distribuida en la sección del haz láser,

la señal generada por el fotodiodo, situado tras la fibra receptora será proporcional al cociente entre el área común entre el haz reflejado y la lente, S_{com} , y el área

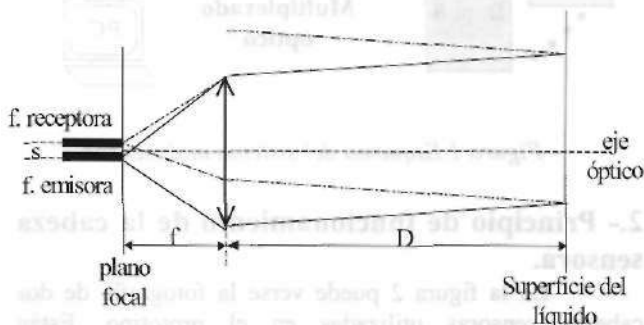


Figura 3: Principio de funcionamiento del sensor. _haz incidente, --- haz reflejado.

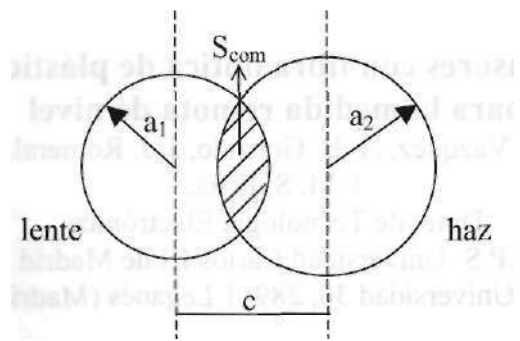


Figura 4: Área común de la lente y el haz reflejado en el caso a)

total del haz reflejado, S_{tot} . Como el ángulo del haz es pequeño, esta superficie común se puede calcular como el área común de dos circunferencias (véase la figura 4).

Si el haz está bien colimado, el radio de la lente (a_1) y del haz reflejado (a_2) deberían ser iguales. Sin embargo, dependiendo de las tolerancias de alineamiento, se puede considerar una pequeña divergencia del haz (a). Con esto, el radio del haz reflejado se calcula como:

$$a_2 = a_1 + 2D \tan(a) \quad (1)$$

Se pueden producir entonces cuatro situaciones distintas:

a) que las circunferencias sean secantes. La señal del fotodiodo, P, vendrá dada por:

$$P(k, \alpha) = k \frac{a_1^2 (\theta_1 - \sin \theta_1) + a_2^2 (\theta_2 - \sin \theta_2)}{2\pi a_2^2} \quad (2)$$

con 0_1 y 0_2 funciones de la geometría del dispositivo.

b) que las circunferencias sean interiores y el radio del haz sea mayor que el radio de la lente (haz ligeramente divergente). En este caso P vale:

$$P(k, \alpha) = k \frac{a_1^2}{a_2^2} \quad (3)$$

c) que las circunferencias sean interiores y el radio del haz sea menor que el radio de la lente (haz ligeramente convergente):

$$P(k, a) = k \quad (4)$$

d) que las circunferencias sean exteriores, en este caso, el fotodiodo no recibe ninguna señal:

$$P(k, a) = 0 \quad (5)$$

donde 0_1 y G_2 son funciones de a , a_2 y de la separación entre los centros de las circunferencias, c. De forma que c viene dado por:

$$c = s \frac{D}{f}$$

k es una constante que da cuenta de efectos como la

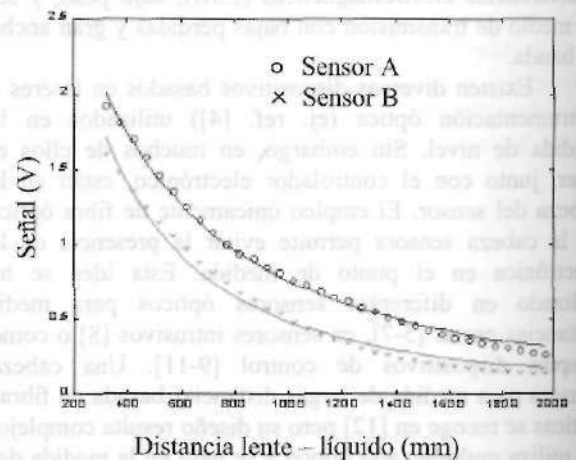


Figura 5: Ajuste de las medidas de los dos sensores

reflectancia del líquido, la atenuación de la fibra, etc.

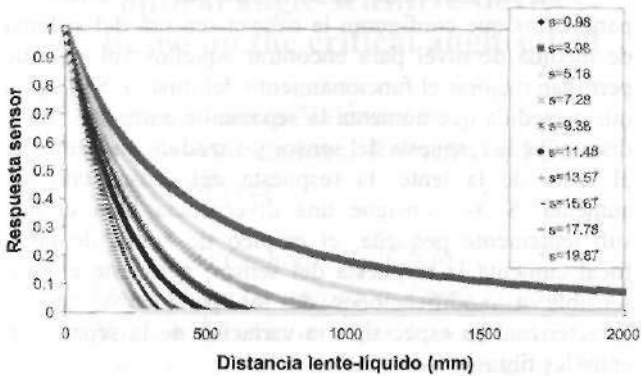


Figura 6: Variación de la respuesta del sensor con s. f=75mm, a_i=30mm, cc=0.02rad

En la figura 5 se puede ver el ajuste de las medidas, realizadas con las cabezas sensoras de la figura 2, al modelo propuesto utilizando el Método de Monte Carlo. El error cometido en el ajuste se puede estimar en torno a un 3% para el sensor con la lente mayor (A), y un 7% para el sensor con la lente de menor diámetro (B). En ambos casos, como puede verse en la tabla 1, la divergencia del haz es menor de 0.02 rad.

Sensor	s(mm)	a _i (mm)	f(mm)	a(rad)	k
A	0.98	30	75	0.020	4.040
B	0.98	12.7	75	0.014	4.988

Tabla 1: Parámetros característicos de los sensores construidos, a y k se obtienen del ajuste.

El estudio teórico de este modelo proporciona las pautas para mejorar el diseño de la cabeza sensora. Los parámetros que pueden influir a la hora de modificar la respuesta del sensor son:

- la separación entre las fibras (s);
- el radio de la lente (a_i);
- la focal de la lente (f);
- la divergencia del haz (oc).

En principio se tomará la constante k como un factor multiplicativo, cuya influencia se limita a modificar el tamaño de la respuesta del sensor. En esta constante, como sabemos, no sólo estarían incluidas las características del sensor, como la atenuación de las fibras ópticas, sino características relativas al líquido en estudio: reflectividad, etc.

Antes de comenzar con las simulaciones, hemos de asegurarnos de que la modificación de los parámetros no nos lleve a situaciones fuera del intervalo de validez del modelo. Por ejemplo, el modo de calcular el radio del haz reflejado, ecuación (1), se basa en suponer que es la lente la que define el tamaño del haz. Esta condición es cierta si:

- la apertura numérica de la fibra (NA) es suficiente para iluminar toda la lente, condición que se cumple siempre que:

$$\frac{a_i}{f} < \operatorname{tg}(\operatorname{arcsen} NA) \quad (7)$$

- al aumentar la separación entre las fibras, s, toda la superficie de la lente está iluminada por la fibra emisora.

Ambos supuestos se han comprobado en todas las simulaciones realizadas, desechando aquellos conjuntos de valores que no cumplían ambos requisitos. Partiendo

de los valores de los parámetros utilizados en el prototipo (para a_i, f y s) y de los valores obtenidos en el ajuste (á), se han estudiado los efectos que produce sobre la respuesta del sensor la variación de cualquiera de ellos.

Comencemos por la separación entre fibras. Se ha tomado como mínimo valor posible el utilizado en el prototipo, s=0.98mm, que se obtiene colocando las fibras juntas y habiendo eliminado el recubrimiento de ambas fibras. Para obtener una separación menor sería necesario utilizar otras fibras de menor diámetro. Como máximo valor se ha elegido aquel compatible con las dos condiciones enunciadas anteriormente.

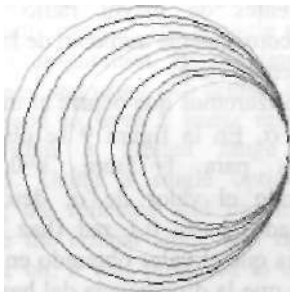


Figura 7: Medidas de la sección transversal del haz propagándose hacia la superficie del líquido. Sensor B

Como se puede apreciar en la figura 6, a medida que aumenta la separación entre las fibras, disminuye la respuesta del sensor para todas las posiciones consideradas. También se observa como disminuye el alcance del sensor, es decir, la máxima distancia que el sensor puede medir, al aumenta s. En concreto, en el sensor A, para separaciones entre las fibras de hasta 3 mm, el valor de s no afecta a la respuesta del sensor. De forma que para esas configuraciones, su comportamiento viene dado principalmente por la ecuación (3), donde la respuesta del sensor es proporcional al cociente de los cuadrados de los radios, relación que no depende de la separación entre fibras. En el caso del sensor B, la separación entre fibras para la cual la respuesta del sensor viene regida por la ecuación (3) es s < 2mm. Para verificar estas afirmaciones se han tomado medidas de la apertura del haz para distancias de 20cm en un rango de 2m; con el sensor B; los resultados se muestran en la figura 7. Se observa como efectivamente la superficie de la lente siempre se encuentra comprendida dentro de la superficie del haz propagado.

Por otro lado, como ya se ha observado experimentalmente (véase la figura 5), a medida que disminuye el radio de la lente, disminuye también la respuesta del sensor. Como puede verse en la figura 8, el modelo también predice este comportamiento. En dicha

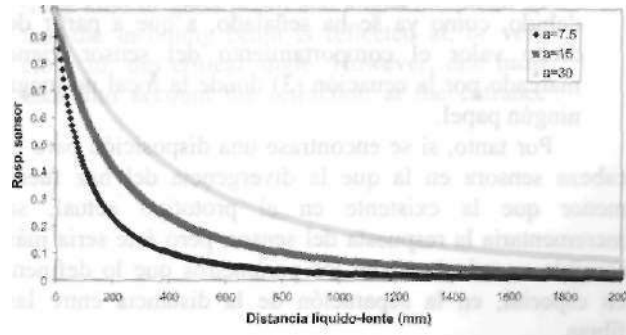


Figura 8: Variación de la respuesta del sensor con a_i. f=75mm, s=0.98mm, a~0.02rad

figura se representa la respuesta del sensor para tres lentes de radios 7.5, 15 y 30mm, con la separación de las fibras constante e igual a su valor mínimo, es decir, $s=0.98\text{mm}$ y $\text{oc}=0.02\text{rad}$.

El siguiente parámetro a estudiar sería la focal de la lente. Como en los casos anteriores, se ha mantenido constante el resto de los parámetros y se ha modificado únicamente el valor de la focal. Para los valores estudiados, no se aprecia variación de la respuesta del sensor con la focal. De nuevo este resultado se debe a que el sensor construido se ajusta principalmente a la ecuación (3), donde no aparece la dependencia con la focal. De todas formas, el utilizar lentes de focales más elevadas permitiría utilizar lentes de mayor radio (véase la ecuación (7)), con el consiguiente aumento de la respuesta del sensor como ya hemos visto.

Por último analizaremos que ocurre al modificar la divergencia del haz, α . En la figura 9 se observan los resultados obtenidos para $f=75\text{mm}$, $s=0.98\text{mm}$ y $a_i=30\text{mm}$, modificando el valor de α , desde 0 (haz perfectamente colimado) hasta 0.1 rad (haz con cinco veces más divergencia que el valor obtenido en el ajuste). Vemos que a medida que la divergencia del haz aumenta, la respuesta del sensor disminuye. Además la curva que describe el comportamiento del sensor para el caso ideal de que la divergencia fuera cero se acerca más a una línea recta que el resto. Sin embargo, si tomando un haz perfectamente colimado se modifican el resto de los parámetros del sensor, en concreto se observa que:

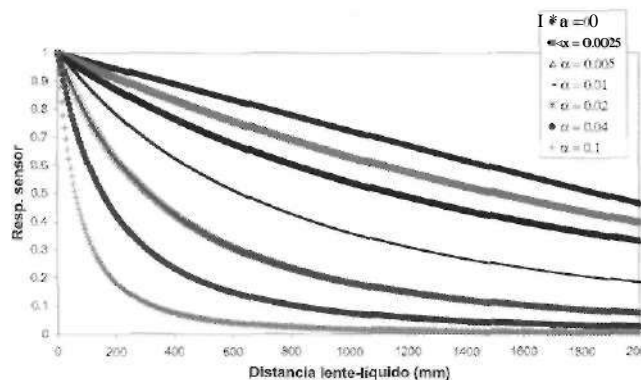


Figura 9: Variación de la respuesta del sensor con α . $f=75\text{mm}$, $s=0.98\text{mm}$, $a_i=30\text{mm}$

- la respuesta del sensor depende de la separación entre las fibras para todos los valores de s , es decir, no aparece un cierto intervalo de tolerancia como era el caso en las primeras simulaciones realizadas;
- la respuesta del sensor depende del valor de la focal. Hasta divergencias de 0.01 radianes, se obtienen mayores respuestas del sensor para focales más largas. A partir de este valor no se aprecia diferencia, debido, como ya se ha señalado, a que a partir de dicho valor el comportamiento del sensor viene marcado por la ecuación (3) donde la focal no juega ningún papel.

Por tanto, si se encontrase una disposición para la cabeza sensora en la que la divergencia del haz fuese menor que la existente en el prototipo actual, se incrementaría la respuesta del sensor, pero éste sería más sensible a variaciones en los parámetros que lo definen, en especial, en la separación de la distancia entre las fibras.

4.- Conclusiones.

Se ha estudiado la influencia de los diferentes parámetros que configuran la cabeza sensora del sistema de medida de nivel para encontrar aquellos valores que permitan mejorar el funcionamiento del mismo. Se llega a que a medida que aumenta la separación entre las fibras, disminuye la respuesta del sensor y a medida que aumenta el radio de la lente, la respuesta del sensor también aumenta. Si se consigue una divergencia para el haz suficientemente pequeña, el empleo de lentes de larga focal aumenta la respuesta del sensor, pero éste es más sensible a modificaciones de los parámetros que lo caracterizan, en especial, a la variación de la separación entre las fibras.

5.- Agradecimientos.

Los autores agradecen las contribuciones de J. Garcinuño, J. E. Cerda y J. Pérez en el prototipo preliminar. Este trabajo ha sido financiado por la Comunidad de Madrid (CAM-07T-0011-2001).

6.- Bibliografía.

- [1] Informe medioambiental de 1998 de Repsol S. A. Validado por Dames&Moore
- [2] <http://www.edomexico.gob.mx/se/proyvapores.htm>
- [3] K. Nakahira, T. Kodama, S. Morita and S. Okuma, "Distance measurements by an ultrasonic system based on a digital polarity correlator", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 5, n° 6, 2001, pp. 1748-1752.
- [4] "Láser liquid level gauge with diffuser", US5648844, 15.07.97
- [5] K. Iwamoto, I. Kawata, "Liquid level sensor with optical fiber", App. Optics, Vol 31, n° 1, 1992, 51-54
- [6] L. Yuan, "Automatic-compensated two-dimensional fiber-optic sensor", Optical Fiber Technology, 4, 1998, pp. 490-498
- [7] R Felgenhauer et al "Fiber Optic displacement sensor with POF", Proceedings of the 1993 Plástic Optical Fibre Conference POF'93, 1993, pp. 171-173
- [8] G. Betta, A. Pietrosanto y A. Scaglione. "A Gray-Code based fiber optic liquid level sensor", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol27,n°1, 1998,pp. 174-178
- [9] A. Wang, M. Gunther, K. Murphy, R. Claus, "Fiber-optic liquid level sensors". *Sensors and Actuators* A35, 161-164(1992).
- [10] P. Raatikainen, I. Kassamakov, R. Kakanakov, M. Luukkala "Fiber-optic liquid-level sensor". *Sensors and Actuators* A58, pp. 93-97 (1997).
- [11] C. Yang, S. Chen, G. Yang "Fiber optic liquid level sensor under cryogenic environment" *Sensors and Actuators* A94, pp. 69-75 (2001).
- [12] WO99/56093 "Remote sensor head for láser measurement devices", 29.03.1998
- [13] C. Vázquez, J. Garcinuño, J. M. S. Pena, A. B. Gonzalo "Multi-sensor System for Level Measurements with Optical Fibres", Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation IECON-2002.
- [14] P200002032 "Sistema sensor óptico para medida de nivel de líquidos en entornos críticos", 9.8.2000.